

El mundo de los átomos

Gustaaf Van Tendeloo

Grupo de investigación EMAT, Universidad de Amberes,
Bélgica

La palabra "átomo" se remonta al siglo V antes de Cristo, cuando el filósofo griego Demócrito la introdujo. Su idea era que, si coges un grano de arena y lo divides, acabarás llegando a un punto en el que ya no podrás dividirlo más... Eso sería "el átomo", que significa literalmente "indivisible". En realidad, Demócrito no estaba tan equivocado; los átomos, tal y como los conocemos ahora, son los bloques de construcción de todo el universo. Sólo que, la escala de Demócrito estaba equivocada; el átomo es mucho más pequeño de lo que él podía imaginar. Un grano de arena contiene unos 10^{20} átomos. Por supuesto, todos sabemos que el átomo no es una bola sólida y que está formado por un núcleo positivo y una serie de electrones negativos a su alrededor, pero esa idea no se lanzó hasta finales del siglo XIX. Científicos como J. J. Thomson y Ernest Rutherford la introdujeron y Niels Bohr la perfeccionó. Pero independientemente de la estructura fina del átomo, podemos considerar con toda confianza que los átomos son los bloques de construcción de todos los materiales, incluidos los materiales vivos.

Pero, ¿por qué preocuparse de elementos tan pequeños que, si se hiciera una cadena de átomos, se necesitarían unos cuatro millones de ellos para alcanzar un milímetro? En efecto, durante siglos vivimos en una macro-tecnología. Incluso las máquinas o instrumentos "automatizados" se fabricaban, en el mejor de los casos, con una precisión milimétrica. Sólo en los últimos decenios, con la introducción de los ordenadores y las nuevas tecnologías, han cambiado las cosas. La tecnología del silicio ha avanzado tanto que los circuitos electrónicos se aproximan ahora al nivel atómico. Hasta el punto de que la nanotecnología gobierna nuestra vida; estamos indefensos cuando nuestro PC no arranca o cuando se cae el servidor. Aplicaciones como la inteligencia artificial (IA) requieren cada vez más memoria y una conmutación más rápida. En este momento, los distintos elementos de conmutación de la matriz de silicio están separados por apenas unos cientos de átomos. Está claro que para superar este límite tenemos que profundizar en el mundo de los átomos. Sin

embargo, para comprender este mundo de átomos, tenemos que ser capaces de observarlos. Pero, como ya se ha dicho, a simple vista esto es imposible. Esto tiene que ver, por supuesto, con la calidad de nuestros ojos, que sólo pueden discernir detalles mayores de 0,1 mm aproximadamente. El medio que utilizamos para observar el mundo que nos rodea es la luz. La luz tiene una longitud de onda del orden de 0,4-0,7 micrómetros (0,0004-0,0007 milímetros), que es, por supuesto, muy pequeña, pero el átomo, con unas dimensiones de unos 0,2 nanómetros (0,0002 micrómetros) sigue siendo un factor de mil más pequeño que la longitud de onda de la luz. Ésta es la razón principal por la que es teóricamente imposible observar átomos utilizando la luz como medio, incluso con los mejores microscopios ópticos. El principio es similar a la observación de detalles en el agua. Una mosca posada en la superficie del agua no distorsiona una onda acuática de un metro de tamaño. La mosca permanece invisible cuando se estudia el patrón de la ola. En cambio, una roca con las mismas dimensiones que la ola distorsionará el frente de la ola y la roca será visible en el patrón de la ola. A grandes rasgos, se puede decir que nunca se pueden observar objetos más pequeños que la longitud de onda del medio. Todo esto suena muy lógico, pero no fue hasta finales del siglo XIX cuando Abbe demostró matemáticamente que para cualquier lente (óptica) el poder de resolución está relacionado con la longitud de onda del medio y la apertura numérica. En el aire y para la luz verde con la longitud de onda más corta, ésta sería de aproximadamente 0,25 micrómetros (250 nanómetros). Esto no basta, ni de lejos, para detectar átomos, ni siquiera proteínas (10 nm) o virus (unos 100 nm), pero sí para obtener imágenes de la mayoría de las células biológicas que se encuentran en el rango de los micrómetros.

Así que hasta principios del siglo XX no había esperanza de observar directamente los átomos, ni siquiera con los mejores microscopios ópticos, que utilizaban fuentes de luz. Pero en la década de 1920 Schrödinger, De Broglie y otros desarrollaron la mecánica cuántica; predijeron y demostraron que una partícula acelerada también podía comportarse como una onda... y viceversa. Así pudieron explicar y predecir el inesperado comportamiento de los materiales a nivel subnanométrico. Esto fue importante para el desarrollo del primer microscopio electrónico. Louis De Broglie demostró claramente que los electrones acelerados pueden asociarse a un carácter ondulatorio con longitudes de onda 1.000 veces menores que la longitud de onda de la luz. Esto inspiró a Hans Busch para construir una lente electromagnética y demostrar que un campo magnético puede desviar el haz de electrones.

Precisamente estos experimentos inspiraron a Ernst Ruska y Max Knoll para acoplar diferentes lentes electromagnéticas y construir en 1931 el primer instrumento de aumento que no utilizaba la luz como medio de imagen. Aunque su primer instrumento sólo obtenía un aumento de 17 veces, demostraba el principio y apenas dos años después su instrumento era capaz de superar la resolución del microscopio óptico. Había nacido el microscopio electrónico!

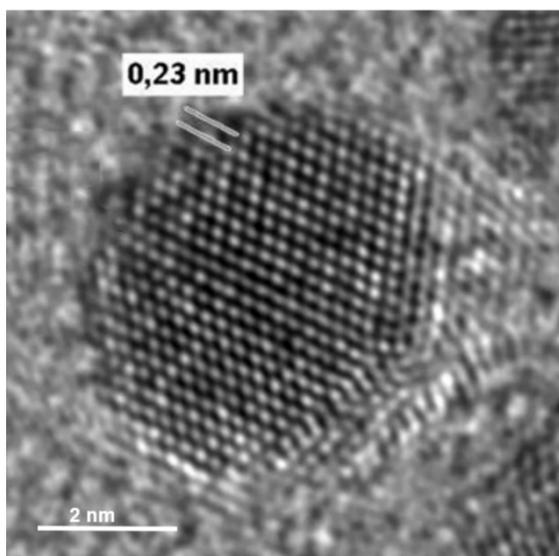
Sin embargo, su invento también se enfrentó a varios problemas adicionales. Uno de los principales inconvenientes de utilizar electrones en lugar de luz es que los electrones se absorben fácilmente en el aire y que los electrones acelerados a unos pocos miles de voltios pueden dañar gravemente el material; en particular, los materiales biológicos o vivos. Como consecuencia, los biólogos, y en este caso el hermano de Ernst Ruska, perdieron interés en la nueva herramienta, ya que todos los biomateriales se carbonizaban bajo el haz de electrones. Sin embargo, la empresa Siemens vio las posibilidades adicionales de este instrumento, lo que dio lugar al primer instrumento comercial en 1939; tenía una resolución 10 veces mejor que el microscopio óptico. El interés se centró en la metalurgia y la inorgánica, ya que la mayoría de estos materiales resistían tanto el vacío como la irradiación de electrones. Otro problema al que se enfrentaban es que los electrones acelerados se absorben fácilmente en el aire y, sobre todo, en los materiales densos. Incluso acelerados a cien mil voltios sólo pueden penetrar en un metal o una cerámica hasta unos pocos cientos de nanómetros. El truco consiste, por tanto, en preparar un material tan fino como cien nanómetros, es decir, ¡mil veces más fino que un cabello! Las soluciones no son sencillas; evitar los artefactos sigue siendo un problema importante.

La limitada capacidad de penetración de los electrones acelerados es la razón principal por la que alrededor de 1970 varias empresas empezaron a desarrollar microscopios electrónicos con tensiones de aceleración más altas, ya que la profundidad de penetración aumenta con el incremento de la tensión. Los microscopios con una tensión de aceleración de hasta 1 millón de voltios no fueron una excepción, pero para la mayoría de los problemas, la ganancia no era fantástica lo que, junto al coste adicional y la menor estabilidad de estos instrumentos, hicieron que poco a poco volvieran a desaparecer del mercado.

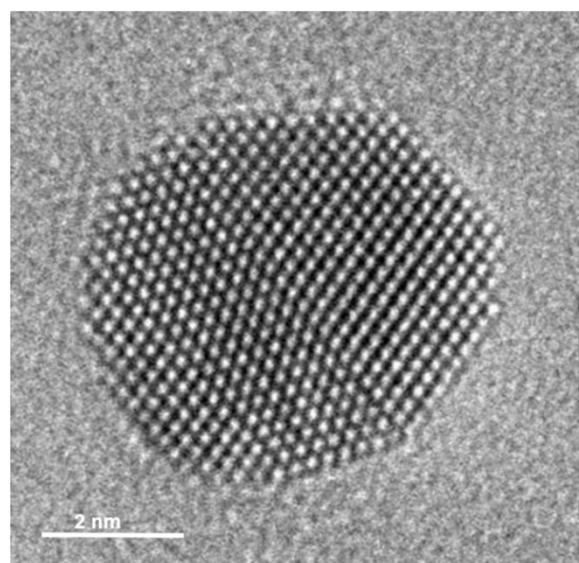
En la década de 1970, la mayoría de los microscopios electrónicos alcanzaron una resolución subnanométrica... al menos para muestras no biológicas.

También es la época en la que me inicié en la microscopía electrónica. A finales del siglo pasado, la resolución de los instrumentos más avanzados alcanzaba habitualmente la escala atómica, es decir, 0,1-0,2 nm, pero la interpretación de las imágenes no siempre era sencilla. La razón es que las lentes electromagnéticas, al igual que las ópticas, sufren todo tipo de aberraciones. La más importante es la aberración esférica, que significa que los electrones dispersados en la parte central de la lente y las partículas dispersadas en la parte exterior de la lente no se concentran en un punto. Obviamente, esto da lugar a una imagen borrosa y a artefactos. A principios de este siglo se introdujeron los primeros correctores de aberración esférica; se trata de un conjunto de hardware de diferentes lentes que compensa estas aberraciones. En 2009 instalamos el primer instrumento comercial con corrección de la aberración esférica en nuestro laboratorio de la Universidad de Amberes. También hay dos de estos instrumentos instalados aquí, en el LMA de la Universidad de Zaragoza. Estos instrumentos garantizan una resolución de hasta 50 picómetros (0,05 nm) y la interpretación de las imágenes plantea menos problemas. La diferencia en la obtención de imágenes sin y con corrección de la aberración esférica se ilustra claramente en la siguiente figura.

Sin corrector



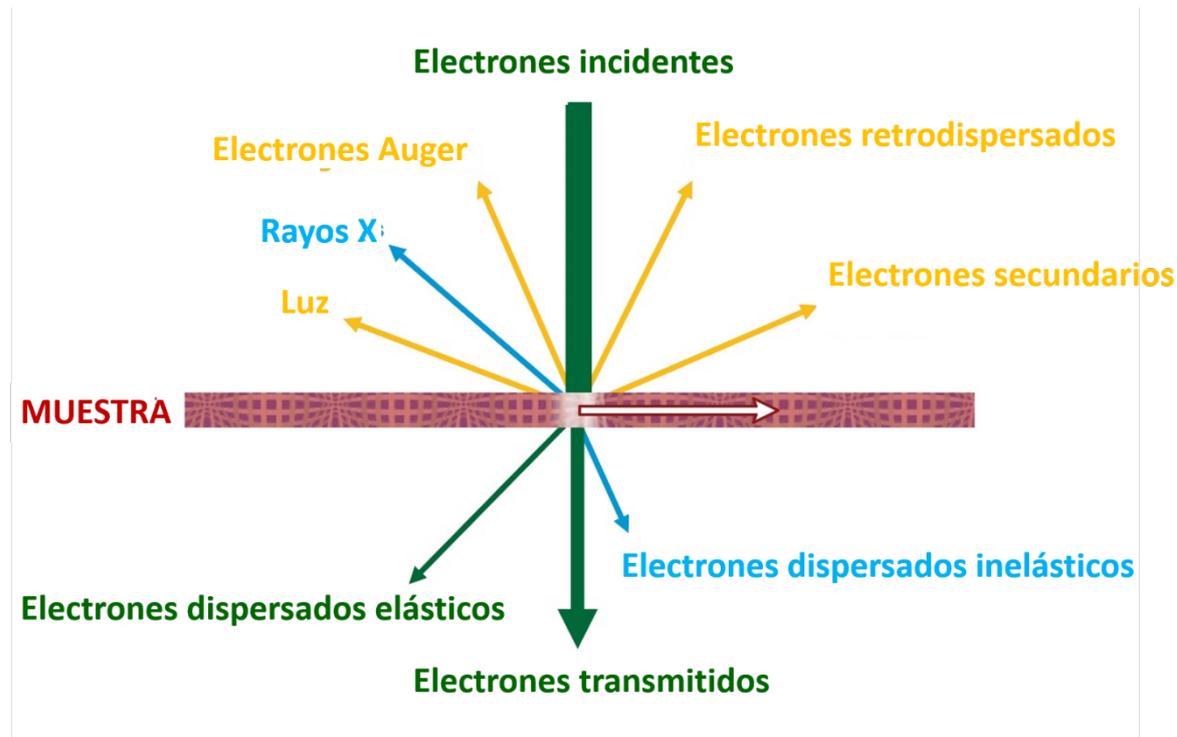
Con corrector



Hasta ahora nos hemos centrado en el poder de resolución del microscopio electrónico, pero este instrumento es mucho más que "una gran lupa". Para entenderlo, primero tenemos que centrarnos en los principios de la microscopía electrónica y explicar cómo podemos no sólo localizar un átomo

concreto en el espacio, sino también determinar su naturaleza e incluso el enlace con sus vecinos.

Al dirigir el haz de electrones acelerados hacia una muestra fina, se produce una interacción mecánica cuántica entre el haz de electrones y los átomos del material. Este haz de electrones puede dispersarse en un rango micrométrico o concentrarse en una región inferior a un nanómetro o incluso a la dimensión de un átomo. En ambos casos, sin embargo, podemos considerar la microscopía electrónica como una técnica muy local. Como los electrones se aceleran a 100.000 voltios o más, tienen una velocidad cercana a la de la luz y, por tanto, la mayoría de los electrones atraviesan el material delgado sin ninguna interacción ni pérdida de energía. Sin embargo, en el caso de un material cristalino, algunos de ellos se dispersan elásticamente en ángulos muy concretos, dando lugar a la difracción de electrones, similar a la difracción de rayos X. Otros chocan con los átomos del material, pierden parte de su energía y generan rayos X específicos, luz, electrones Auger, electrones secundarios, electrones retrodispersados, ... Todas estas ondas y electrones salientes proporcionan información sobre el material iluminado por el haz de electrones. Los microscopios electrónicos modernos están ahora equipados con accesorios adicionales que les permiten analizar la mayor parte de esta información. El microscopio electrónico es ahora un instrumento analítico completo y mucho más que la "gran lupa" del siglo pasado. Hoy en día se puede medir la composición química local hasta una escala atómica a través de los rayos X generados o de la pérdida de energía que han sufrido los electrones dispersados inelásticamente. Además de la composición, también se puede determinar el enlace entre átomos vecinos analizando la estructura fina de los electrones dispersados inelásticamente. En un material de carbono puro, por ejemplo, se puede deducir con relativa facilidad si la estructura es de tipo diamante o grafito.



Otro punto delicado es el hecho de que la mayoría de las imágenes, como la anterior, dan la impresión errónea de que se ha alcanzado la resolución atómica. Sin embargo, nunca hay que olvidar que cada una de estas imágenes es una proyección bidimensional de un objeto tridimensional. Los puntos brillantes de la imagen son en realidad las posiciones de columnas de átomos vistas a lo largo de la dirección del haz de electrones entrante. Más adelante explicaremos cómo obtener información tridimensional (3D) a partir de varias imágenes bidimensionales (2D).

A día de hoy se pueden obtener imágenes de materiales hasta la escala atómica, determinar la composición de cada átomo y analizar su estado electrónico, pero siempre hay que tener en cuenta que todas las observaciones se realizan dentro del vacío del microscopio electrónico y bajo la irradiación con electrones acelerados. Estas circunstancias pueden influir en el comportamiento del material y producir resultados diferentes de su comportamiento en condiciones ambientales.

Por ello se han realizado grandes esfuerzos en el desarrollo de la microscopía electrónica in situ, tratando de imitar las condiciones ambientales. En esencia, esto significa que el estrecho espacio que rodea la muestra se convierte en un minilaboratorio. Calentar, enfriar y colar ya era posible desde hace bastante tiempo, pero recientemente se han introducido celdas cerradas para poder trabajar bajo diferentes presiones de gas de oxígeno, nitrógeno o hidrógeno. Incluso se pueden observar nanomuestras emergidas en líquido y seguir su

comportamiento en función de la temperatura o bajo estimulantes eléctricos o magnéticos. De este modo, las reacciones químicas, por ejemplo, las catalíticas, pueden seguirse in situ a escala submicrométrica. Sin embargo, la resolución atómica en estas condiciones todavía no es posible.

Todo esto hace que ahora la microscopía electrónica esté extendida por todo el mundo y que la mayoría de los grupos de investigación analítica en ciencias de los materiales, bio-ciencias o ciencias médicas tengan ahora acceso a un microscopio electrónico avanzado. En una época en la que se buscan dispositivos cada vez más pequeños o se analizan estructuras orgánicas complejas como proteínas o células cancerosas, la técnica ha ganado una enorme popularidad. Sin embargo, debido a su complejidad y a los posibles escollos en la interpretación de los resultados, la técnica sigue siendo una especialidad en sí misma. Esto es lo que hemos estado haciendo en nuestro grupo de investigación durante los últimos cinco decenios. Seguidamente presentaré una visión general de importantes descubrimientos que sólo pudieron hacerse con la ayuda de la microscopía electrónica.

Análisis de defectos

Hasta hace menos de un siglo, los científicos desconocían la presencia o la naturaleza de los defectos presentes en todos los materiales. En cambio, ahora estamos familiarizados con el hecho de que ningún material es perfecto y que los defectos no sólo están siempre presentes, sino que además rigen en gran medida las propiedades (mecánicas, químicas, ...) del material. Los distintos tipos de defectos incluyen defectos puntuales de dimensión cero, defectos unidimensionales como las dislocaciones, defectos bidimensionales o planares como los fallos de apilamiento y defectos tridimensionales (precipitados o vacantes).

Un buen ejemplo es nuestro material natural más fuerte: el diamante. La calidad de una piedra preciosa viene determinada no sólo por su peso y su talla, sino también por su color y transparencia. El color es especialmente interesante. Cuando se descubrió, por microscopía electrónica, que el color de un diamante viene determinado por la presencia de dislocaciones y el número y la posición del nitrógeno en la red de carbono, surgió la idea de cambiar el color de un diamante irradiándolo y calentándolo, de modo que un diamante "barato" de color marrón o gris podía adoptar un color rosa o coñac... ¡y un precio más alto!

Otra contribución importante es el papel que ha desempeñado la microscopía electrónica en la optimización de varios aceros. El acero tiene una base de hierro, pero, por ejemplo, el acero inoxidable contiene cromo y carbono, además de otros elementos como manganeso, níquel o titanio. La microscopía electrónica permite localizar con exactitud todos estos elementos y determinar su papel en la resistencia del material.

Materiales basados en carbono

Hasta 1985 sólo se conocían dos formas de carbono: el diamante y el grafito. Pero entonces un grupo de científicos estadounidenses y británicos descubrió que 60 átomos de carbono pueden formar una molécula esférica muy estable; la llamaron "fullereno" en honor al arquitecto Buckminster Fuller, que ha estado trabajando con estructuras similares en la macroescala. En el grupo fuimos pioneros en la obtención de imágenes directas de cristales de "bucky balls" de C60 y C70 mediante microscopía electrónica. Esto no fue sencillo, ya que las moléculas son muy sensibles al haz de electrones de alta energía. Unos años más tarde, S. Iijima descubrió que el carbono también puede formar nanotubos, ya sean de extremo abierto o cerrado; en este último caso, la esfera final se corresponde con medio fullereno. Estos nanotubos tienen una enorme resistencia, más de cien veces superior a la del acero, y son extremadamente ligeros y muy flexibles lo que puede apreciarse claramente en la imagen inferior. No es de extrañar que se utilicen en numerosos dispositivos de la vida cotidiana; por ejemplo, bicicletas de carreras o raquetas de tenis. Gracias a la microscopía electrónica pudimos desvelar el proceso de crecimiento de estos nanotubos de carbono ((Science 267, 1334-1338 (1995))); un mecanismo que impulsó la producción de nanotubos disponibles en el mercado.



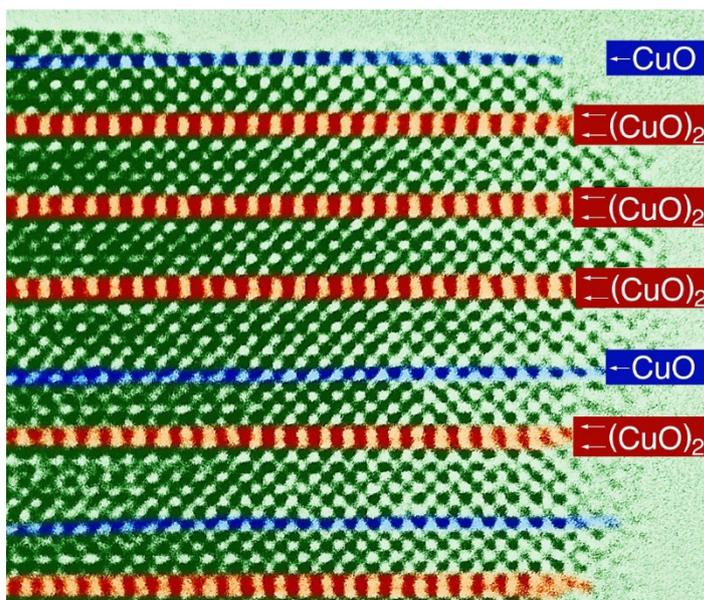
En 2004, Geim y sus colaboradores aislaron un único plano bidimensional de átomos de carbono formando una red hexagonal: el grafeno. El grafeno es extremadamente fino, muy resistente, transparente y conductor. Además, la conductividad puede ajustarse dopando el material, por ejemplo, con nitrógeno. Este descubrimiento ha dado un gran impulso a la industria de los semiconductores, sobre todo para las células solares, los circuitos fotónicos o las pantallas táctiles de los teléfonos inteligentes. También hay un enorme interés por utilizar el grafeno como material alternativo para los cátodos de las baterías de litio.

Superconductores de alta temperatura

La superconductividad se conoce desde 1911, cuando K. Onnes descubrió que la conductividad del mercurio descendía repentinamente a cero a temperaturas en torno a los 4K. Más tarde se descubrió el mismo efecto en varios compuestos intermetálicos, pero durante mucho tiempo la temperatura crítica se mantuvo por debajo de 23K. Pero en 1986 Muller y Bednorz descubrieron que la superconductividad también puede darse en materiales cerámicos con temperaturas superiores a los mágicos 23K. Esto creó un boom

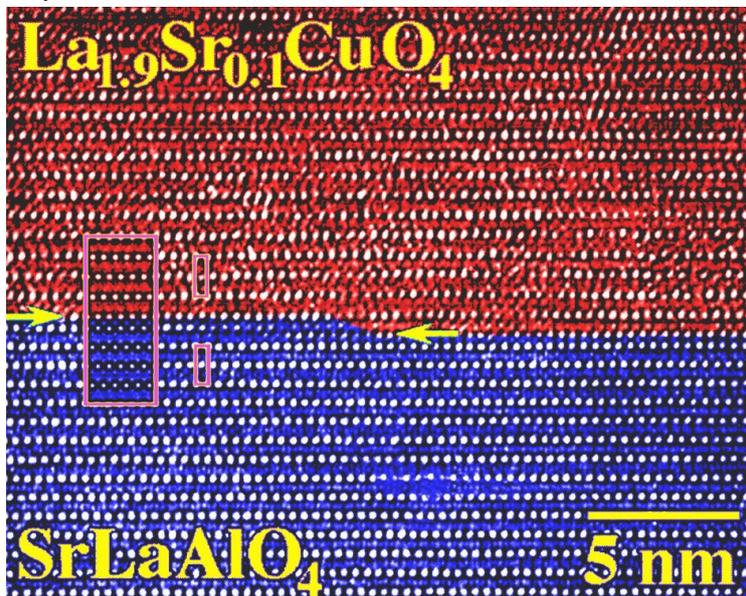
en el descubrimiento de nuevos superconductores y pronto la temperatura crítica de algunos compuestos se elevó por encima de 77K, que es el punto de ebullición del nitrógeno líquido. En este momento, y desde hace varios años, la T_c más alta ronda los 130K a presión atmosférica.

La microscopía electrónica ha desempeñado un papel crucial en el descubrimiento de nuevos superconductores. De hecho, la composición química de estos materiales es en su mayoría muy compleja; por ejemplo, Y-Ba-Cu-O o Bi-Sr-Ca-Cu-O. En particular, la ubicación y el orden de los átomos de oxígeno son esenciales para la aparición de la superconductividad. Como el análisis de rayos X tiene una baja sensibilidad para el oxígeno en presencia de átomos más pesados, la microscopía electrónica es casi la única técnica para determinar la estructura local y analizar los (muchos) defectos de estos materiales. En particular, la presencia de defectos planares específicos ha permitido descubrir nuevos superconductores con temperaturas críticas más elevadas. En el famoso superconductor $YBa_2Cu_3O_7$ (el primer superconductor con una temperatura crítica superior a la del nitrógeno líquido, 77K) los planos superconductores de CuO_2 siguen una secuencia regular (en rojo en la parte superior de la figura), pero a veces el plano de CuO_2 es sustituido por otro de CuO . Si esto ocurre de forma regular (parte inferior de la figura) se forma un nuevo superconductor $Y_2Ba_4Cu_7O_{15}$. De esta manera también descubrimos un nuevo superconductor de 110K en el sistema Bi-Sr-Ca-Cu-O (Nature, 332, 620-623 (1988)).



Los nuevos materiales superconductores con temperaturas críticas superiores al punto de ebullición del nitrógeno líquido son tecnológicamente muy

interesantes, ya que el coste de la refrigeración se reduce mucho al utilizar nitrógeno en lugar de helio. Sin embargo, el principal problema que dificulta su introducción en la tecnología es la fragilidad de estos materiales cerámicos. Por ello, los superconductores de capa fina son mucho más útiles para las aplicaciones tecnológicas y, por ello, los investigadores se centraron principalmente en esta tecnología. En este sentido, fue muy importante que pudiéramos duplicar la temperatura crítica introduciendo tensión epitaxial entre un sustrato (SrLaAlO_4) y una película delgada $(\text{La-Sr})\text{CuO}_4$ (Nature 394, 453-456, (1998)). La diferencia en el parámetro de red entre la película y el sustrato obliga a la película fina a adoptar distancias interatómicas que no adoptaría en condiciones sin tensión. Estos minúsculos cambios de unos pocos picómetros parecen ser de suma importancia y determinan las propiedades superconductoras.



Mejorar y comprender el funcionamiento de las baterías de litio

Un tema de máxima actualidad es la búsqueda de baterías de Li con un mayor rendimiento. En la actualidad se consumen más de medio millón de toneladas equivalentes de carbonato de litio al año y las previsiones apuntan a que esta cantidad se triplicará de aquí a 2025. La mayoría de los materiales para electrodos de Li más novedosos y eficientes sufren una caída de tensión al ciclar. Mediante una combinación de microscopía electrónica avanzada y espectroscopía de fotoelectrones de rayos X pudimos revelar que la migración de cationes entre las capas metálicas y las capas de Li es una característica intrínseca del proceso de carga-descarga pero que – desgraciadamente – también aumentan los iones metálicos atrapados en las caras tetraédricas intersticiales. Pudimos establecer claramente la correlación entre estos iones

atrapados y el decaimiento del voltaje. El decaimiento más lento se produce obviamente para los cationes con mayor radio iónico. Nuestros hallazgos proporcionaron nuevas perspectivas para el desarrollo de electrodos estratificados de alta capacidad que evaden el decaimiento del voltaje (Nature Materials, 14, 230 - 238 (2015)).

En efecto, las baterías de iones de litio se basan en procesos redox catiónicos que constituyen la principal fuente de energía de la electrónica portátil. La capacidad de estos materiales radica en las reacciones redox aniónicas, que se pensaba que formaban especies similares a los peroxos. Mediante microscopía electrónica avanzada en el modo STEM, combinada con espectroscopia de pérdida de energía de electrones, pudimos visualizar directamente la unión oxígeno-oxígeno. Fue un punto importante para comprender el proceso redox aniónico en estos materiales (Science 250, 1516 - 1521 (2015)).

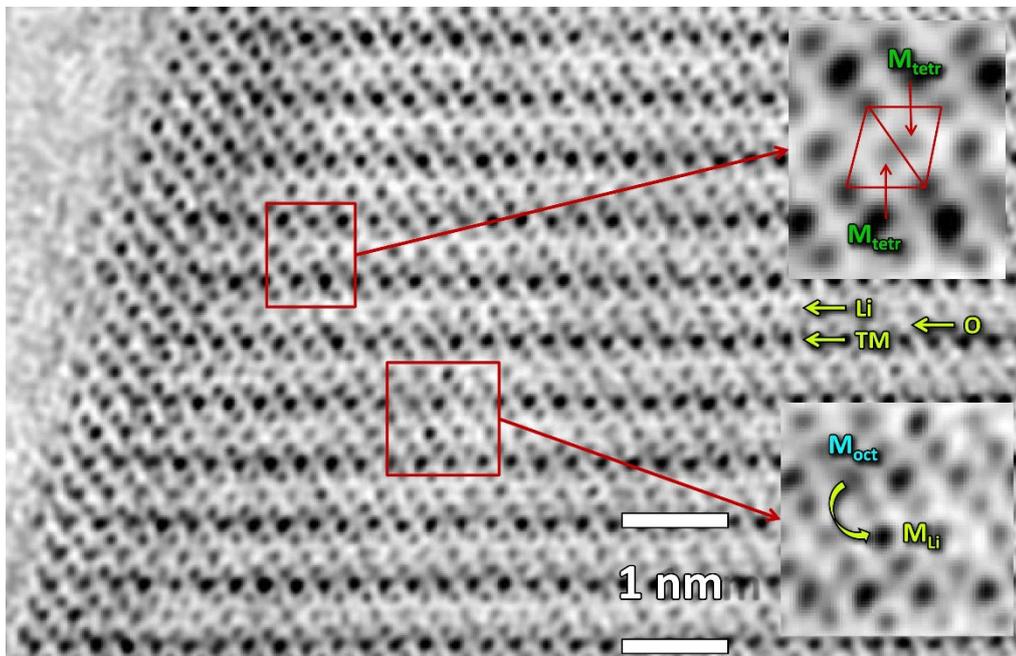


Imagen de resolución atómica de un material NMC rico en Li descargado a 2 V. El recuadro superior muestra un defecto puntual en el que un catión se encuentra en un vacío tetraédrico en lugar de en la posición octaédrica habitual. El recuadro inferior muestra la dirección de migración del catión $M(\text{etal})$ desde la capa $\text{Li}_{1-x}\text{M}_{2+x}$ hacia una posición octaédrica adyacente (Chem.Mat. 29, 9923 (2017)).

Imágenes en 3D

Cuando se quiere visualizar un objeto en 3D, es sabido que basta con girar el objeto en todas las direcciones para obtener una impresión tridimensional. Sin

embargo, en un microscopio electrónico es un poco más complicado. La muestra yace sobre una rejilla plana de cobre recubierta de carbono y se aprieta dentro del estrecho espacio entre las lentes magnéticas. En condiciones normales, no es posible inclinarla más de 360° ; en el mejor de los casos, se puede inclinar de $+70^\circ$ a -70° . Evidentemente, esto deja una zona sin explorar, la llamada brecha de miscibilidad, que puede crear artefactos y dar lugar a información engañosa e incluso errónea. Por lo tanto, hay que tener mucho cuidado al reconstruir el objeto 3D recogiendo varias imágenes 2D bajo diferentes ángulos; en la mayoría de los casos, unas pocas decenas. El límite de resolución de esta técnica está en el rango nanométrico y puede proporcionar información útil sobre la morfología de, por ejemplo, una nanopartícula.

Sin embargo, para obtener la resolución atómica de un material cristalino habrá que recoger imágenes a lo largo de diferentes ejes de zonas cristalográficas de bajo orden y reconstruir el espacio tridimensional a partir de un número muy limitado de imágenes bidimensionales. Hace unos diez años fuimos los primeros en presentar un método novedoso para reconstruir de este modo la estructura atómica de una nanopartícula en tres dimensiones (Nature, 470, 274-377 (2011)). Seguimos desarrollando la técnica que dio lugar a la ASTRA Toolbox, como plataforma abierta para la reconstrucción de imágenes 3D en tomografía electrónica. Proporciona bloques de construcción rápidos y flexibles que se pueden utilizar para desarrollar algoritmos de reconstrucción avanzados.

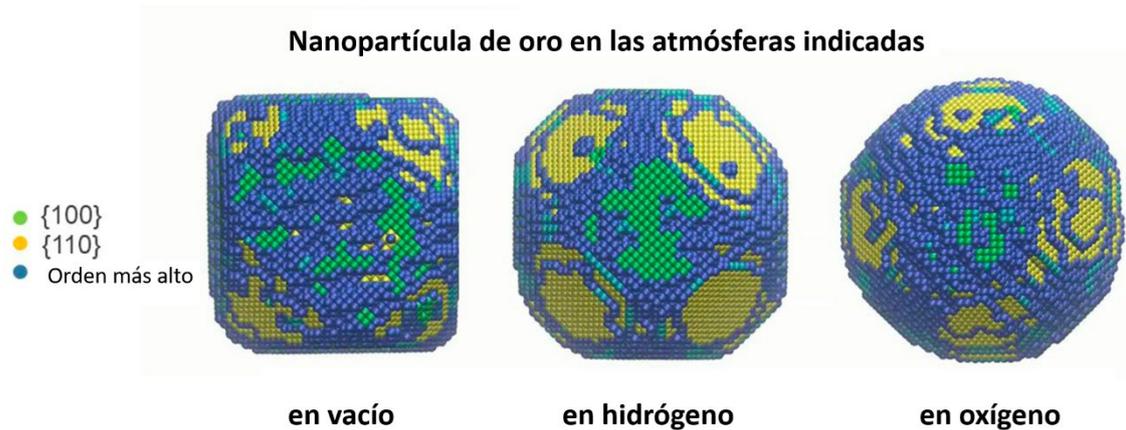
Durante los últimos diez años, esta técnica se ha perfeccionado aún más, de modo que ahora se pueden obtener imágenes 3D con resolución atómica en las que la relajación (desviación de los átomos de su posición normal), así como los planos de terminación de las nanopartículas, pueden determinarse con precisión picométrica. Es bien sabido que las propiedades físicas de las nanoestructuras dependen del tipo de facetas superficiales. En el caso de los nanorods de Au, las facetas superficiales tienen una gran influencia en efectos cruciales como la reactividad y la adsorción de ligandos. Propusimos una metodología para medir la estructura atómica 3D de nanopartículas libres, que aplicamos para caracterizar las caras superficiales de *nanorods* de Au (Nature Materials, 11, 930 - 935 (2012)).

Más recientemente nos hemos centrado fundamentalmente en la presencia de quiralidad en materiales nanoestructurados, es decir, nanomateriales que carecen de simetría especular. La quiralidad en nanopartículas y

nanoestructuras inorgánicas ha suscitado un interés científico cada vez mayor, debido a la posibilidad de ajustar su capacidad de interactuar de forma diferente con luz polarizada circularmente hacia la izquierda y hacia la derecha. En algunos casos, la actividad óptica tiene su origen en la morfología quiral del nanomaterial. Sin embargo, cuantificar el grado de quiralidad de los objetos nanométricos no es tarea fácil. La tomografía electrónica ofrece la posibilidad de recuperar fielmente la morfología tridimensional de los nanomateriales, pero sólo se había demostrado una interpretación cualitativa de la morfología de las nanopartículas quirales. En el grupo desarrollamos una metodología que permite cuantificar la helicidad de nanomateriales quirales complejos. Un análisis a nivel de una sola partícula nos permitió conocer mejor el origen de la quiralidad y las propiedades quirópticas.

En un futuro próximo, nuestro grupo de investigación se va a centrar en la interacción entre nanopartículas metálicas quirales y materiales biológicos o moléculas quirales orgánicas. Algunas nanopartículas quirales inorgánicas exhiben una actividad óptica inusualmente elevada. Además, muestran una clara diferencia de actividad biológica en función de su lateralidad izquierda o derecha. Esto abre nuevas posibilidades para reproducir la actividad enantioselectiva de la contraparte bioquímica. Suena muy lógico, pero la comprensión de la quiralidad en los materiales nanoestructurados aún no está clara. Además, no es sencillo diseñar nanopartículas con geometrías predecibles o múltiples, similares a las entidades biológicas. Tales partículas podrían ser muy interesantes y encontrar aplicaciones, por ejemplo, en el diagnóstico médico.

Uno de los problemas de esta investigación es el hecho de que la tomografía electrónica 3D requiere mucho tiempo y la obtención de resultados fiables de alta resolución puede requerir hasta varios días. Por supuesto, esto dificulta la reproducibilidad y la interpretación estadística de los resultados. Por ello, recientemente hemos desarrollado métodos para acelerar significativamente (hasta un factor de diez) el proceso de adquisición de datos y la subsecuente reconstrucción. Esto dará lugar a nuevos métodos para una recogida de datos más eficaz.



Otro problema importante es el hecho de que la mayoría de los trabajos de tomografía electrónica se realizan al vacío y es bien sabido que las reacciones superficiales entre las nanopartículas y las moléculas orgánicas o los biomateriales pueden ser muy diferentes cuando se exponen al aire o a un líquido, en lugar de al vacío.

En la imagen superior se muestran los resultados de la misma nanopartícula en el vacío, en una atmósfera de hidrógeno y en una atmósfera de oxígeno. Estas imágenes son el resultado de un análisis tridimensional completo hasta la escala atómica y cada punto representa un átomo individual. Es evidente que, dependiendo de la atmósfera, no sólo cambia la forma de la partícula, sino que también se ven afectados los planos superficiales. Los distintos colores ilustran los diferentes planos superficiales (100) o (110).

Como aplicaciones prácticas se podría pensar en la interacción de las nanopartículas dentro del circuito sanguíneo del cuerpo humano. Está claro que aún queda mucho camino por recorrer, pero teniendo en cuenta los progresos realizados en las últimas décadas, no parece irreal pensar que en un futuro próximo la microscopía electrónica pueda desentrañar la interacción entre nanopartículas con forma predeterminada con ciertas entidades biológicas. Estoy convencido de que esto podría suponer un gran avance en el tratamiento local de diversas enfermedades.

En cuanto al futuro de la microscopía electrónica en la ciencia de los materiales, y los biomateriales nos esperan enormes retos. Como se ha ilustrado a lo largo de esta ponencia, la microscopía electrónica ha pasado de ser una gran lupa a convertirse en un auténtico minilaboratorio dentro del instrumento, capaz de proporcionar no sólo información sobre la estructura (atómica) del material, sino también sobre su comportamiento ante cambios de temperatura, cambios

ambientales, así como impulsos mecánicos o eléctricos externos. Seguro que esto no será el final de la historia y que se podrán realizar más mini operaciones dentro del estrecho espacio entre las lentes del microscopio electrónico. Otro gran reto es el de extraer más información, que ahora nos resulta oculta, a partir de las interacciones haz de electrones-muestra, como la emisión de luz, electrones Auger o electrones secundarios.